

绿色矿山

“双碳”目标下中国矿山的发展与建设模式

Development and Construction Model of Chinese Mines under
“Dual Carbon” Goal

赵迺琳(中国恩菲工程技术有限公司,北京 100038)

摘要:随着《巴黎协定》的签署,中国正在加速开展减排行动,并为按时实现2030年碳达峰与2060年碳中和的“双碳”目标,做出了相应的战略部署。在这样的背景下,我国的矿业也将迎来能源消费结构与产业结构的大规模转型。调查研究国内外现阶段的矿业企业碳排放来源、矿山中已经实施的碳中和手段以及待开发的未来低碳技术,将为推动绿色矿山的发展提供重要科学依据,并为我国矿业产业实现转型提供参考价值。本文综述了矿业产业的温室气体排放的构成与核算方法,矿业企业碳中和行动的实施路径与方案,未来节能减排新技术以及辅助碳汇项目的发展方向。

关键词:绿色矿山;智能矿山;净零碳;碳中和;节能减排

中图分类号:TD989

文献标志码:A

文章编号:1672-609X(2022)03-0083-07

Abstract: With the signing of Paris Agreement, China has been accelerating emission reduction campaign, and has made corresponding strategic deployment to achieve the “dual carbon” goal of carbon emission peak in 2030 and carbon neutrality in 2060 on schedule. Under such circumstance, the mining industry in China will also usher in a large-scale transformation in the mix of energy consumption and industrial structure. The investigation and research on the current carbon emission source of mining enterprises at home and broad, carbon neutrality method already implemented in mines and the future low-carbon technologies to be developed will provide a significant scientific basis for the development of green mines and referential value for the transformation of mining industry in China. This paper reviews the composition and accounting method for greenhouse gas emissions in the mining industry; the implementation path and scheme of carbon neutrality action in mining enterprises and development direction of new technologies on energy conservation and emission reduction and auxiliary carbon sink projects.

Key words: green mine; intelligent mine; net zero carbon; carbon neutrality; energy conservation and emission reduction

1 前言

21世纪是历史上温室气体排放增长最快的时期,仅最近20年的碳排放占比就高达历史记录的31%,大量的温室气体排放加速了全球平均气温的提升^[1]。面对日益严峻的气候变暖危害,绿色低碳发展已经在国际社会内达成普遍共识。为了将全球平均气温提升较工业化之前的水平控制在1.5℃~2℃,自2015年12月起已有196个国家加入了《巴黎协定》。协议拟定发达国家将率先于2050年实现净零碳(Net Zero 2050),成员国可以根据自身发展情况与基本国情,提出不同的阶段性目标与相应政

策^[1-2]。而我国也在2020年9月郑重承诺了在2030年实现碳达峰、2060年实现碳中和这一“双碳”目标,由此正式加入全球应对气候变化的统一战线^[3]。其中“碳达峰”是指国家或企业历史上碳排放的最高值,而“碳中和”则是指在一定时间内,直接或间接产生的温室气体排放总量,可以通过植树造林等形式进行抵消,实现碳排放量的“收支相抵”^[4]。

各种研究统计数据表明,全球碳排放超过73%与能源相关,且主要以一次性消费的化石能源为主^[5]。我国每年煤炭使用的碳排放也超过72%,占全球排放量的19%^[6]。在“双碳”背景下,我国的能源消费结构急需迎来从煤炭到新型能源的全面转型。与此同时,《全球矿业发展报告2019》表示,矿业在全球经济发展中占据重要位置,占全球温室气体排放量的4%~7%。因此矿业作为促进我国经济发展和能源结构转换的重要一环,也将面临规模

[作者简介] 赵迺琳(1996-),女,硕士,主要从事采矿工程与岩石力学方面的研究工作。

[引用格式] 赵迺琳.“双碳”目标下中国矿山的发展与建设模式[J].中国矿山工程,2022,51(3):83-89.

性的调整。而作为冶金、化工企业等高能耗产业的上游供应商,矿业企业的“碳中和”能力也会对我国金属冶炼行业实现“双碳”目标的进度产生较强的影响力。图1所示为我国一次能源消费结构。

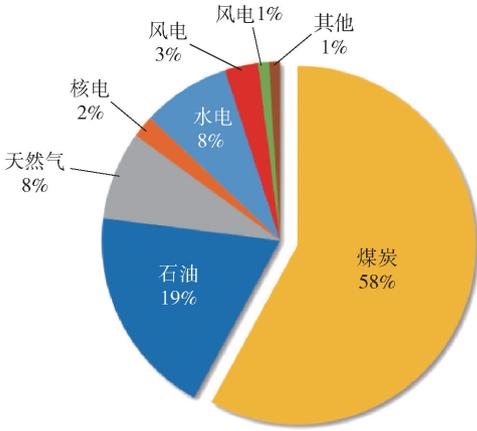


图1 2019年我国一次能源消费结构

2 矿业产业的碳排放核算

2.1 温室气体排放核算体系

国际上较为权威的温室气体量化标准有 ISO 14064 系列, ISO 14067, PAS 2050 和 Green House Gas Protocol (GHGP)^[7]。其中, GHGP 由世界资源组织(WRI)和世界可持续发展工商理事会(WNSCD)于2009年联合发布,已针对中国做出了区域化修订,应用较为广泛。根据GHGP的标准,生产企业的温室气体排放可以划分为三个范围:范围一包括生产过程中可控源头的直接温室气体排放;范围二包括能源消耗导致的间接排放;范围三则来自产业供应链中上下游业务的间接排放^[8]。

欧洲从2005年起陆续地更新欧盟碳交易系统,用来统一生产行业的各自温室气体计量标准,美国也在全国范围内发布并实施了强制性温室气体排放

清单报告制度(GHGRP)。与此同时,我国碳计量体系的构建也在持续进行中。整体框架遵循IPCC指南,并逐步更新于《企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》。从2011年至今,共发布的三份文件包含了24个重点行业的碳排放计量方法与相关要求。2013年成立的全国低碳计量技术委员会,负责碳排放量与减排量计算的技术规范研究、制定和推广应用。

2.2 矿山中的碳足迹

按照采矿工序,矿山中的碳排放来源大致可分为三个阶段:开采、运输、选矿,而每个阶段又可以按照工艺的种类进行进一步分类,具体如图2所示^[9]。已有数据显示,矿山每年的温室气体排放量大约在200~400 kt CO₂ equivalent,因产量和开采方式的不同导致浮动区间较大,例如位于澳大利亚的一座原矿石年产量约25 Mt的露天铁矿,每年的碳排放量约176 kt CO₂ equivalent。但由于露天和地下开采的碳排放量基本相同,其中露天矿因土壤移除而产生的温室气体排放(生态系统、植被碳固存能力下降),相当于地下矿中额外的废气排放(深度加长的运输路径)^[10]。

由于矿山中所包含工艺流程的复杂性,设备的多样性,使得每一座矿山具有独特的特性,需要进行个案分析,因此对于矿山碳排放量的核算以及碳足迹的估算面临巨大挑战。目前为止绝大部分的矿山仍选择根据历史数据进行推演的方法,以年为单位,粗略的估计矿山碳排放量。这样难以做到准确、透明、持续、完整的温室气体排放量检测与计算,为后续节能减排计划,以及中和、净零的战略部署增加了不少的难度。因此,推动矿山数字化监管的应用与普及,可以为实时检测提供良好的动态的碳排放数

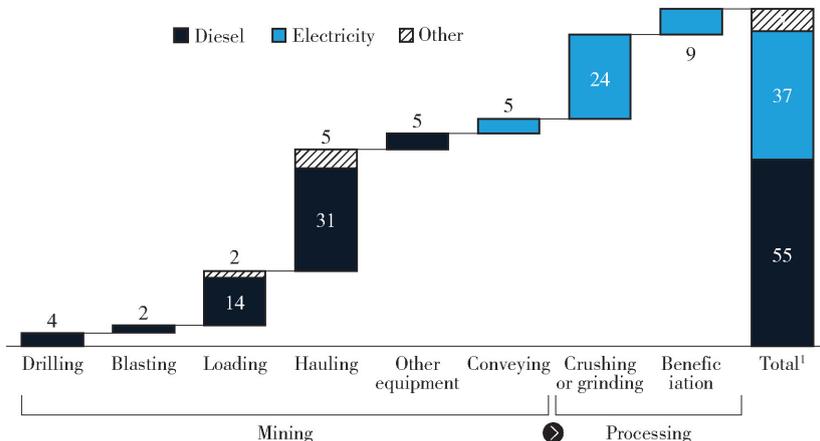


图2 矿山生产中的碳排放源头(示例:澳大利亚年产量25 Mt露天铁矿)

据基础,为矿山企业提供更为详细的排放报告,从而协助制定更为精准的减排目标与更加适用减排方案,进一步加快矿山实现“双碳”目标^[11]。

3 国际矿业企业的“双碳”规划

大型矿业公司在全球矿业中占据重要地位,仅4成公司的全球市值占比高达80%。他们不仅拥有全球优质矿产资源,还影响着全球矿业的实现净零碳的转型计划。在全球气候变化背景下,国际范围内的众多资源行业巨头,包括嘉能可(Glencore)、力拓(Rio Tinto)、淡水河谷(Vale)、比和必拓(BHP)、

巴里克(Barrick)等公司在内,都已积极响应《巴黎协定》,提出了各自的减碳目标,并为企业实现“碳达峰”与“碳中和”定下截至时间^[12-16]。上述企业均在其可持续发展报告或年度报告里表明了他们已经在,改变生产方式、注重低碳生产理念、支持科技发展等方面,围绕既定的碳减排与碳中和目标,制定了相应的行动计划以及战略部署。从资金投入,到技术开发、跨领域合作和新设备、新材料的引进等多重方面,逐步推进矿业企业的低碳生产与绿色产业链的发展。大型矿业公司目标方案见表1。

表1 国际大型矿业公司的碳中和目标与战略方案

企业名称	碳中和年限	战略目标		
		中期目标	范围一和范围二	范围三
 嘉能可	2030年	减少20%绝对碳排放	①使用13%的可再生能源; ②降低20%能源产生的碳排放	①减少20%的间接碳排放; ②成立碳运输和储存(CCUS)研究公司,进行技术与基础设施建设
 力拓	2030年	减少39%绝对碳排放提高金属提炼品位	①使用可再生能源和电池系统; ②使用轨道和电车代替燃油; ③退出煤炭产业探索锂市场及相关产业	①和宝武钢铁、清华大学合作实现低碳钢铁产业链; ②ELYSIS合作建立低价水利发电项目; ③研究低碳铝加工投资研发碳回收的新技术
 淡水河谷	2030年	减少33%绝对碳排放恢复10万顷以上植被	在巴西实现100%自主生产清洁能源	①建立低碳峰会,链接上下游产业链企业; ②投资分析碳价格浮动为生产带来的风险
 比和必拓	2030年	减少30%排放量	①研究电动卡车车队与可再生能源的应用; ②购入可再生PPA材料	①为钢铁企业提供技术支持,帮助减少30%排放强度; ②与大学合作,为CCUS投入US\$20m进行研究; ③与Hatch, FMG等大型公司结为绿色联盟
 巴里克	2030年	减少10%的绝对碳排放	①减少20%能源相关的碳排放; ②研发电网稳定技术; ③开始采用太阳能能源建立天然气发电站	①开始进行范围三的基线研究并制定目标; ②为减碳相关技术进行投资并成立集团旗下相关组织; ③与上游供应链开展关于低碳生产的交流合作

4 我国“双碳”目标下的矿山建设模式

对比各家大型矿业企业的“双碳”战略规划不难看出,尽管公司受所属国、资产所在地以及公司结构等影响,呈现的减排计划各有不同,但综合考虑可以大致将“双碳”矿山建设的行动路径划分为六大方向。

4.1 提高运输效率,减少生产活动的直接碳排放

研究显示,在矿山全生命周期内,在采矿阶段由于生产运输活动而产生的直接碳排放量占比高达45%~60%,而运输活动带来的能源消耗占比也高达35%^[10]。因此减少移动设备的尾气排放成为了实现矿山碳中和的首要任务之一。矿山中平均只有

0.5%左右的设备是全电动的,因此还有很大的发展空间,如果将运输设备全部更换为电池驱动,将减少矿山近25%的碳排放^[17]。因此,矿业企业还需积极协助新能源电池技术的研发与推广,通过优化电池的储能效率、充电时间、工作时长,使电动设备的运营效益得到显著提升,从而弥补其总拥有成本高于传统柴油移动设备近20%所带来的投资压力。

除了直接选用电池或油电混合的运输设备,部分矿山也开始采用数字化建模和仿真模拟计算来进行矿山的运输演算,利用信息化平台来进行资源分配、车队调度以及设备管控。将智能平台和联网的运输设备相结合,可以大大缩短运输路径,减少排队、空运的情况发生。还有研究指出,在运输路径得到了优化的情况下,随着路径的缩短、卡车的高效利用,可以大量减少轮胎橡胶的使用,也同样有助于减少项目温室气体的排放量^[18]。这样的建设构思可以从能源消耗的角度解决问题,在保证矿山稳定实现节能减排的前提下,大幅度提高生产效率。

4.2 优化工艺设计,实现资源利用率最大化

降低损失、贫化率,提升矿石回收率一直都是矿山生产的核心目标,因此在选矿阶段用到的大型研磨设备正是矿山中仅次移动车辆的第二大碳排放来源。随着新型设备的引进,资源回采率的逐步增高,选矿设备的处理效率也会得到提升,采矿工艺设计需要随之进行改进。世界银行集团的矿业资源报告还指出,到2050年,为了满足对清洁能源技术日益增长的需求,石墨、锂和钴等矿物的产量将增加近500%,部署风能、太阳能、地热能以及能源储存将需要30亿t以上的矿物和金属资源^[19]。因此,从有色金属到镍、锂、稀土等可再生和电气化原材料的需求转变,也会导致矿山工艺设计的改变。

一方面,矿山可以根据新型设备的出矿量、能耗、工作时长等参数,做出工艺设计上的权衡与调整,使工厂中固定设备的用电量以及化石燃料的使用量大大减少,从而降低能源消耗带来的碳排放量。另一方面,数字化的生产与智能化的管理可以极大的提高资源利用率,并降低不必要的能源损失。在工艺设计过程中采用数值模型、协同平台、信息采集等技术,可以协助数字孪生矿山的建设,使原材料、工作装置、生产设备、人员劳动力等资源的利用得到最大化,在保证生产进度与生产安全的前提下,加速矿山实现在生产阶段的节能减排目标。

4.3 实现矿区能源结构转型,全面覆盖可再生能源

近10年我国的煤炭消费每年增长约1.7%,可再生能源与清洁能源在重工业使用并不广泛,煤炭依旧是我国现阶段矿业产业的主要能源^[20]。以黄金产业为例,总产量占中国黄金80%以上的十大省份,清洁能源消耗量仅占比17%,温室气体排放强度范围在792~1881 kgCO₂ e/oz^[21-22]。尽管我国在2010年至2019年期间的万元国内生产总值煤炭消费量由0.85 t下降至0.45 t,但发达国家的智能化已经逐步引领国家的万元GDP煤耗向着0.1 t迈进。这就意味着我国还需通过“双碳”计划带动能源消费的革命,大幅提高清洁能源及可再生能源的覆盖率,并降低煤炭使用占比。目前在全球范围内,中国正在逐步成为可再生能源生产大国,是现阶段投资最高的国家。我国风能发电年均增长3千万千瓦,光伏年均增长近5千万千瓦,预估将在2030年实现风能、太阳能的绝大面积覆盖^[23]。这样的发展趋势可以迅速降低可再生能源的成本与使用价格,从而提高其相较于传统化石能源的竞争力。由于清洁能源电力运输的成本较高,因此在偏远地区建设独立的发电站可以使清洁电力更为经济且广泛的覆盖整个矿区,并带动偏远地区的供电范围。图3所示为部分国家和地区太阳能光伏产能增量。

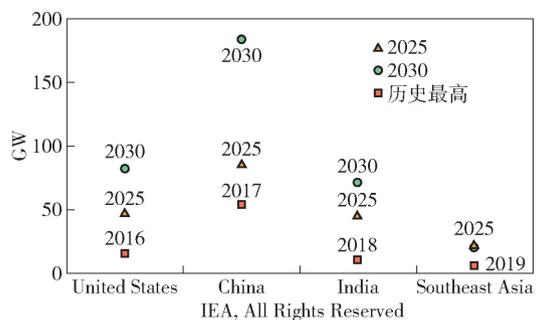


图3 部分国家和地区的太阳能光伏产能增量

4.4 提高设计绿化率,减少废弃物体量,提高生态系统固碳水平

植被流失、土壤剥离和生物多样性遭到破坏,一直是影响矿区内生态系统平衡的重要问题。矿区的开采严重影响了生态环境中的碳循环及其本身的固碳能力,也通常被算作碳量增长的根本问题之一。此外,随着的矿石品位变低,直接导致了尾矿及废石产量的增加,从而加大了固废材料的占地面积。因此,对矿区的土壤保护以及生物种类的稳固是一个长期且艰巨的难题。针对生产中的矿山和历史遗留矿区,可以考虑通过下述方法对生态环境进行保

护与修复,恢复其固碳、循环的能力。

成功的生态修复可以提高矿区近 20% 的固碳能力,是帮助实现矿山碳中和的良好解决方法之一。矿区中的碳汇源头同样依赖于植被与土壤。通过改良土壤、修复植被等土地复垦方法来改善矿区的生态环境以及土壤功能,可以加强矿区损坏环境的修复能力,同时提高其生态系统的固碳能力,从而实现碳库平衡的状态。矿区需采用因地制宜的方法,根据气候环境条件,物种分布情况,矿区结构规模等方面,做出综合评价并量身定制专属复垦方案,从而尽快提高矿区固碳能力。生态环境保护措施见表 2。

表 2 生态环境保护措施

保护类型	保护措施		
植物保护	就地避开	迁地移植	重新栽植
动物保护	设立人工栖息地	红外检测活动情况	
土壤保护	回铺剥离表土	草甸修复	
水资源保护	循环利用	人工建湖	
绿色建筑	建筑改造	设计节材	低碳材料
尾矿回收	尾矿回采	尾矿回填	化学分解

4.5 实施碳定价并协助碳汇项目,实现产业碳排放负增长

碳定价的引入被认为是最有效的遏制温室气体排放机制,在 2021 年 2 月,碳价已升至 40 欧元的历史最高水平^[24-25]。目前我国已成立了 9 个碳交易所,全国碳排放权交易市场也已于 2021 年 7 月 16 日成功的全面上线。欧盟在 2014 将矿业确定为生产成本或竞争力产生受碳定价影响最为重大的行业。澳大利亚、加拿大和美国在研究中发现,由于行业能源消耗的强度和国际贸易的风险系数,矿业和金属行业,是将受碳定价贸易影响最大的行业^[26-28]。因此矿业产业需提高对碳定价的重视程度,提前模拟公司在不同碳价与大宗商品价格时期盈利能力的变化,并提前部署相关碳汇项目。

由于生产活动中不可避免地会排放温室气体,因此大部分企业选择了购入辅助增汇业务来对碳排放进行抵消,从而达到“净零”排碳的目标。在 1988 年,随着危地马拉一个拥有 200 万 t 的减排量的植树计划以 220 万欧元的价格售出,自此,对于林业碳汇交易的研究、实践与推广便在全球范围内持续展开^[29]。直到 2018 年,共有 13 个国家的碳交易体系纳入了林业碳抵消计划,共计 1 500 个以上的项目累计融资达到至少 60 亿美金。在 2020 年,位于加

拿大的 McIlvenna Bay 铜矿,就是利用内蒙的森林保护项目与危地马拉的风能项目,实现了“净零”矿山^[30]。林业抵消机制目前也在我国的北京、福建与广东开展了试运行。因此,协助发展多种碳汇机制、支持碳汇融资,并积极参与农林业增汇项目,可以大幅度减轻矿山企业在必须维持高产能前提下的“双碳”达标压力,是作为矿山实现碳净零的重要手段之一。

4.6 利用碳捕捉与封存技术,形成碳回收与碳循环

通过将二氧化碳从排放源中分离、封存以及再利用,可以实现对二氧化碳的捕集、利用与封存(CCUS),从而减少工业的二氧化碳排放量,帮助实现“净零”排放^[31]。随着国际上对该技术的普遍认同,我国的 CCUS 技术也得到了更多关注,2019 年前已经开展了 31 个示范项目。然而目前 CCUS 面临的最大挑战是技术成本。我国目前最成熟的 CCUS 成本在煤电厂中为 300 ~ 900 元/t,而运输成本为 0.3 ~ 1.4 元/t·km。因此,矿业企业可以考虑协助 CCUS 的示范应用与技术研究,随着 CCUS 标准体系与政策补贴的完善,共同降低技术成本并加速 CCUS 的推广,加快矿山“双碳”进程的脚步。

在矿业领域,镁铁质矿山有着实现碳中和的强大能力。由于其岩石矿物质成分高镁、高硅以及富含氢氧化物的特殊性,许多镁铁质矿山的尾矿区域都发现了碳酸盐包壳。传统的碳捕集技术主要依赖于向岩石结构中注入超临界二氧化碳的地层封闭,而新一代的碳矿化技术,可以利用碳酸盐矿物直接生产碳并进行碳分离与捕捉^[32-33]。实验表明,通过人工加速尾矿堆里矿物质的碳化,并采用适当的收集办法进行回收出售,可以抵消矿山约 20% ~ 60% 的碳排放,常见的人工加速方法包括以下几种^[34-35]:

(1) 增加放矿口数量,加大沉积堆表面积,控制尾砂沉积速率,以延长水镁石在沉积堆表面的停留时间,从而增强并持续超镁铁尾矿石与大气中二氧化碳的反应。

(2) 建立管道网络,在尾矿中注入循环富含二氧化碳的流体,并通过工程控制手段限制二氧化碳泄漏,来加速尾矿库深部碳化反应。

(3) 重新设计矿石冶炼流程,增加异地碳化反应器,并在矿石加工的最后阶段,将发电产生的烟气导入碳化反应器,收集更多的二氧化碳。

5 总结

相较于西方发达国家,中国实现“双碳”目标所遇到的挑战更为艰巨。不仅时间紧张,我国对于煤炭能源的依赖也远高于已经实现工业智能化的发达国家,且制造业仍处于国际产业价值链的中低端,能耗物耗较高、高质量产品种类较少。在双碳背景下,对于有色金属这类传统的高能耗产业而言,生产惯性难以短时间被解决,普通的减排手段已经不能带来更显著的效果,因此中国矿业产业急需系统性的结构调整。一直以来,生态环境的保护与建设都在我国的长远发展规划中有着显著的战略地位。因此,矿业产业需要加速领域内的低碳技术创新,推动绿色智能矿山转型,提高矿山生产质量以及加强生态环境保护等,为助力我国金属矿山实现“双碳”目标提供有力支持。

打造低碳矿山最关键的方法是利用电动移动设备,从运输中的碳排放入手,减少范围一内的直接排放。中期生产规划可以考虑再矿区内广泛利用绿色节能的固定设备,并实现由煤炭转换为可再生能源或清洁能源的能源转型。长期发展则可以与上下游产业链的冶炼企业、原材料供应商、设备厂商等组成联盟,共同打造绿色低碳的产业价值链,持续扩大“双碳”在矿业领域的影响范围。矿业企业也需要及时进行决策上的调整,在投资阶段考虑项目的环境影响和低碳成本,在工艺设计阶段考虑新型工艺、能源和原材料的应用,在建设阶段考虑数字化生产和信息化平台的搭建,实现自上而下的顶层“双碳”战略规划。在此目标下,矿业企业还要加速对减污降碳技术的投资与助力,实现绿色低碳技术的重大突破,推动社会向绿色低碳转型,为了获得长期的社会声誉、市场竞争力与经营能力,制定更为适用的运营计划。

[参考文献]

[1] United Nations Climate Change. The Paris Agreement [OL]. [2021 - 05 - 30]. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>.

[2] IEA. Net Zero by 2050 [OL]. [2021 - 06 - 21]. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.

[3] 全国能源信息平台.“碳达峰”和“碳中和”是啥?了解一下[OL]. [2021 - 06 - 21]. [https://baike.baidu.com/reference/56175236/543do8PmbPCCUYTIpp2ZXKUH-JZerzQb8gnkHjdzFC2YT0QNHjDTYBGC1okBzcNcVzRqlLEJLzMXRpZDm7-](https://baike.baidu.com/reference/56175236/543do8PmbPCCUYTIpp2ZXKUH-JZerzQb8gnkHjdzFC2YT0QNHjDTYBGC1okBzcNcVzRqlLEJLzMXRpZDm7-h1aWqKSNOMEQdt2xDZQbkiXDHd5TsktXb8DNzMTP-nYUDfVia)

h1aWqKSNOMEQdt2xDZQbkiXDHd5TsktXb8DNzMTP-nYUDfVia

[4] 何建坤,解振华,等.中国长期低碳发展战略与转型路径研究[J].项目综合报告编写组,2020.

[5] Climate Watch. The World Resource Institute [OL]. [2021 - 05 - 30]. <https://www.climatewatchdata.org/>

[6] WANG Q, LI R. Journey to burning half of global coal: trajectory and drivers of China's coal use [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 58: 341 - 346.

[7] 华夏理财 ESG 研究组.“碳中和”与 ESG 投资系列报告[R].华夏理财,衍界咨询,香港中文大学(深圳),2021,3.

[8] World Resource Institute. A corporate accounting and reporting standard [R]. Greenhouse Gas Protocol, 2021.

[9] Legge H. et al. Creating the zero-carbon mine [R]. McKinsey & Company, 2021.

[10] Gan Y, Griffin W M. Analysis of life-cycle GHG emissions for iron ore mining and processing in China—Uncertainty and trends [J]. Resources Policy, 2018: 58.

[11] Garcia R, Freire F. Carbon footprint of particleboard; a comparison between ISO/TS 14067, GHG Protocol, PAS 2050 and Climate Declaration [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 66(3): 199 - 209.

[12] Glencore. Pathway to net zero 2020 climate report [R]. 2020.

[13] Rio Tinto. Our approach to climate change 2020 [R]. 2020.

[14] Kinross Gold Corp. Sustainability report 2019 [R]. 2020.

[15] Barrick. Sustainability report 2020 [R]. 2020.

[16] BHP. Sustainability report 2020 [R]. 2020.

[17] Henderson K, Maksimainen J. Here's how the mining industry can respond to climate change. McKinsey Sustainability [OL] [2022 - 03 - 07]. <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/sustainability-blog/here-is-how-the-mining-industry-can-respond-to-climate-change>.

[18] Rodvalho E., et al. Reducing GHG emissions through efficient tire consumption in open pit mines [J]. Journal of Cleaner Production; 2020, 255, 120 - 185.

[19] Hund K, La Porta D., et al. Minerals for climate action: The mineral intensity of the clean energy transition [R]. World Bank, 2020.

[20] 强海洋,高兵,郭冬艳,等.碳中和背景下矿业可持续发展路径选择 [J]. 中国国土资源经济, 2021, 34(4): 8.

- [21] National Bureau of Statistics of China. Output of energy products[OL]. [2021 - 06 - 21]. <https://data.stats.gov.cn/english/easyquery.htm?cn=E0101>.
- [22] Zhang H. Official release; 20 rankings of China gold industry [OL]. https://m.sohu.com/a/279462369_684666.
- [23] IEA. World energy outlook. 2021 [OL]. International Energy Agency. Paris, 2020. [2021 - 06 - 21]. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>.
- [24] Fremstad A, Paul M. The impact of a carbon tax on inequality[J]. *Ecol. Econ.* 2019, 163:88 - 97.
- [25] The World Bank. State and Trends of Carbon Pricing 2021[R]. Washington, DC: World Bank, 2021.
- [26] Clarke H, Waschik R., 2012. Australia's carbon pricing strategies in a global context. *Econ. Rec.* 2012, 88: 22 - 37.
- [27] Ho S M, Morgenstern R, Shih J. Impact of Carbon Price Policies on U. S. Industry[J]. *Resources For The Future*, 2008, 97.
- [28] National Round Table on the Environment and the Economy. Getting to 2050: Canada's transition to a low-emission future; advice for long-term reductions of greenhouse gases and air pollutants [R]. National Round Table on the Environment and the Economy, 2007, 94.
- [29] 何桂梅,陈绍志. 林业碳汇交易:两类市场并进 多种机制革新[OL]. 国家林业和草原局. [2021 - 06 - 21]. <http://www.forestry.gov.cn/zlszz/4262/20190304/143441868749029.html>.
- [30] AGP Mining Consultants Inc. NI 43 - 101 Technical Report, pre-feasibility study for the McIlvenna Bay project[R]. Foran mining corporation, 2020.
- [31] 蔡博峰,李琦,林千果,等. 中国二氧化碳捕集、利用与封存(CCUS)报告(2019)[R]. 生态环境部环境规划院气候变化与环境政策研究中心, 2020.
- [32] Huijgen W J J, Comans R N H. Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation [R]. Energy Research Center of the Netherlands, 2004.
- [33] Power I M, et al. Carbon mineralization: from natural analogues to engineered systems [J]. *Rev. Mineral. Geochem*, 2013, 77: 305 - 360.
- [34] Harrison A L, Power I M, Dipple G M. Accelerated carbonation of brucite in mine tailings for carbon sequestration. *Environ. Sci. Technol.*, 2013, 47: 126 - 134.
- [35] Wilson S A., et al. Offsetting of CO₂ emissions by air capture in mine tailings at the Mount Keith Nickel Mine, Western Australia: rates, controls and prospects for carbon neutral mining [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 25(6):121 - 140.

(上接第25页)

国内咨询设计单位必须敢于创新,敢于自我革命,尽快适应、融合、满足矿业发展的新需要,将现有的二维CAD制图改为三维矿业软件设计,加大工艺试验和实验研究,创新科学技术方法和手段为咨询设计提供更多量化的依据,改革资本市场矿业公开报告等。MIM以三维数字技术为基础,集成了矿山工程项目各种相关信息的工程数据模型,可实现矿山全生命周期动态变化过程的数字化表达,MIM技术将成为矿业信息化的未来,必将发挥越来越重要的作用。

4 结论

在未来矿业发展过程中,MIM是咨询设计生产行业设计工具和方法的一次革命,是咨询设计理念与流程的全面革新,尽管目前还未真正研发出一款成熟的平台,但本文基于目前国内外知名的矿业三维软件体系和中国恩菲自主开发的软件,探索了MIM在地下采矿资源模型的创建,岩石力学研究,

采场设计,工程设计,通风模拟,采掘进度计划(储量公开报告),投资估算,财务分析等项目评价全流程的应用,与目前的项目评价流程相比,优势明显,将是矿业咨询设计生产行业未来发展的趋势,也是未来智能矿山的基础。

[参考文献]

- [1] 于润沧. 采矿工程师手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2009.
- [2] 程海星. 矿井三维协同设计系统开发初探[J]. *煤炭技术*,2018,37(10):280 - 282.
- [3] 邵为民. 基于Surpac软件的地下采矿计划MineSched的应用[J]. *中国矿业*, 2012,21:328 - 331.
- [4] 刘永旭. 基于Mine Sight Atlas的地下矿山三维采掘进度计划编制[J]. *采矿技术*, 2017,17(5):95 - 98.
- [5] 刘泽民. 基于DIMINE软件的三维采场爆破设计[J]. *中国矿山工程*, 2016,45(4):33 - 35.
- [6] 于润沧,刘诚,朱瑞军,等. 矿山信息模型——矿业信息化的发展方向[J]. *中国矿山工程*,2018,47(5):1 - 3 + 13.